

Metody hydrogeologického výzkumu III.

Konstrukce ekvipotenciál

Základní pojmy

Hydraulická výška – piezometrická úroveň – potenciometrická úroveň

- hydraulický potenciál (hodnota energie) podzemní vody v daném bodě lze stanovit měřením hydraulické výšky
- tlaková výška nad srovnávací rovinou (obvykle hladina moře)

Hydraulický gradient

- maximální rozdíl výšek při minimální stejné vzdálenosti paralelní se směrem proudění
- rozdíl mezi hydraulickými výškami způsobuje pohyb vody – proudění
- horizontální gradient – hydrogeologické vrty, studny, povrchové vody
- vertikální gradient – piezometry umístěné blízko sebe

Hladina podzemních vod – povrch saturované zóny, ve které je tlak ve zvodni roven atmosférickému tlaku

Piezometrický povrch (potenciometrický povrch) – úroveň hladiny, do které by vystoupala ve vrtu pronikajícím napjatou zvodní či úrovní s hydraulickou výškou převyšující hladinu podzemních vod

Ekvipotenciála – linie spojující místa se stejnou hydraulickou výškou

Hydroizohypsa – průmět ekvipotenciály do roviny

Hydroizopieza – dtto pro zvodeň s napjatou hladinou

Proudnice – podzemní voda proudí kolmo na průběh ekvipotenciál (při anizotropii hydr. vodivosti = 1), směr proudění ukazuje proudnice

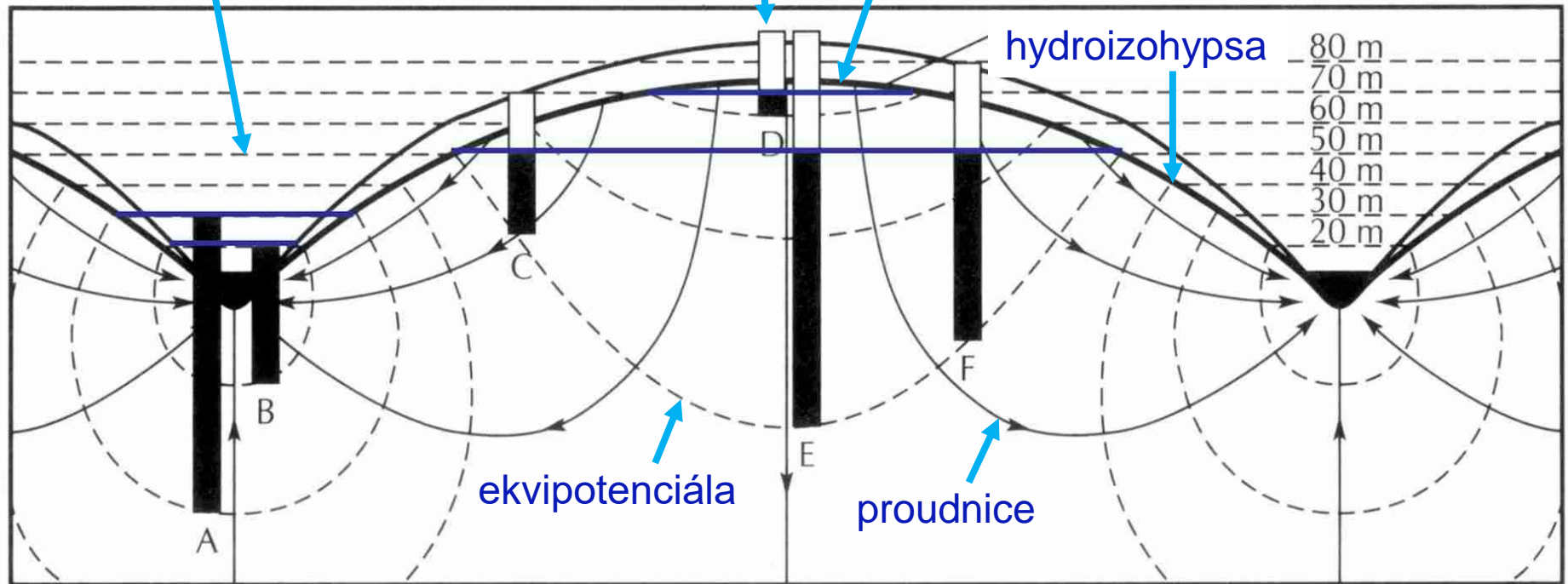
Proudová síť – znázornění systému proudění prostřednictvím ekvipotenciál a proudnic, půdorys či v řezu (výstupy z modelů možnost 3D zobrazení)

Proudová síť

hydraulická výška
(piezometrická úroveň)

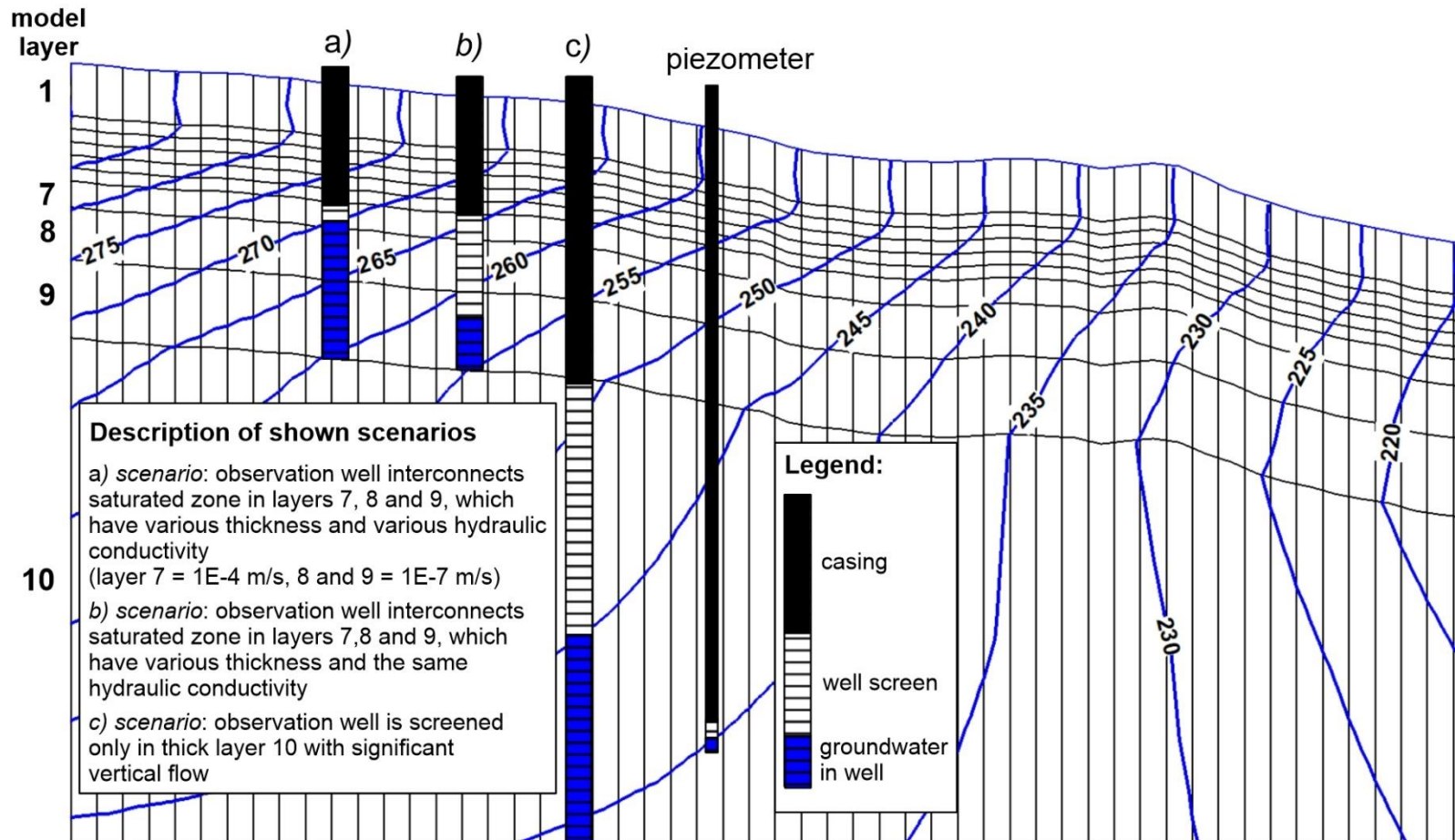
piezometr

hladina podzemních vod

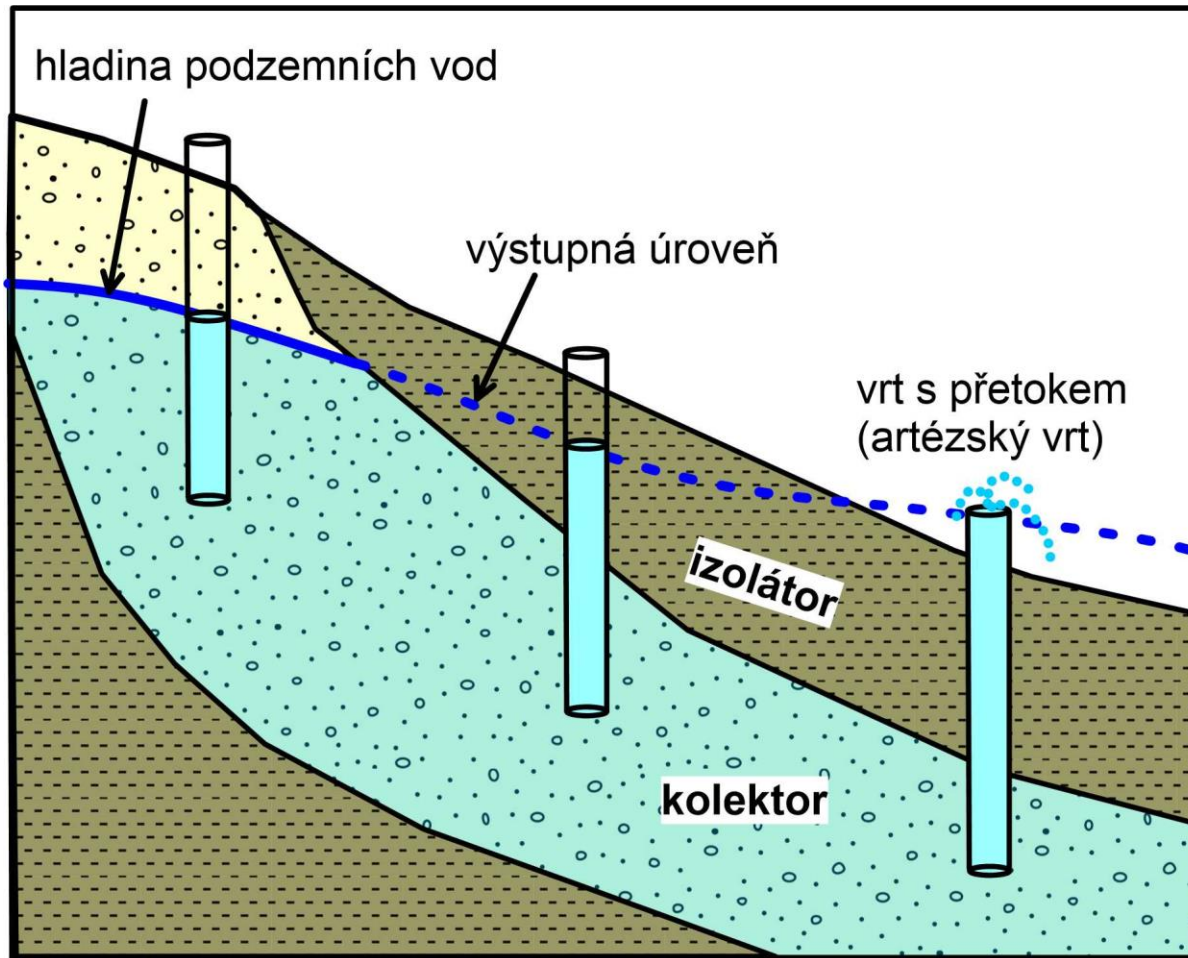


Hydrogeologický vrt a piezometr

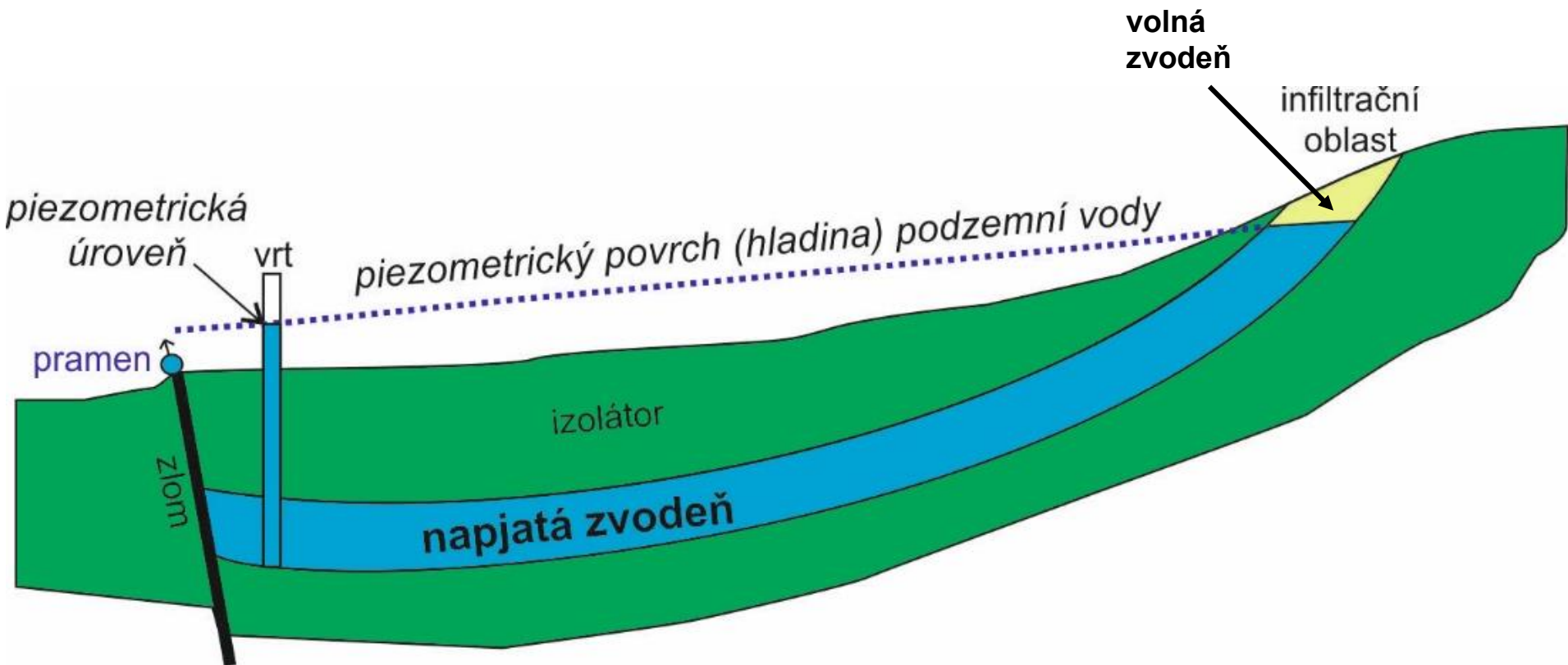
- vliv výškové polohy a délky filtrační části vrtu na měřenou hladinu (hydraulickou výšku) ve vrtu
- piezometr – bodová informace o hydraulické výšce



Napjatá zvědeň



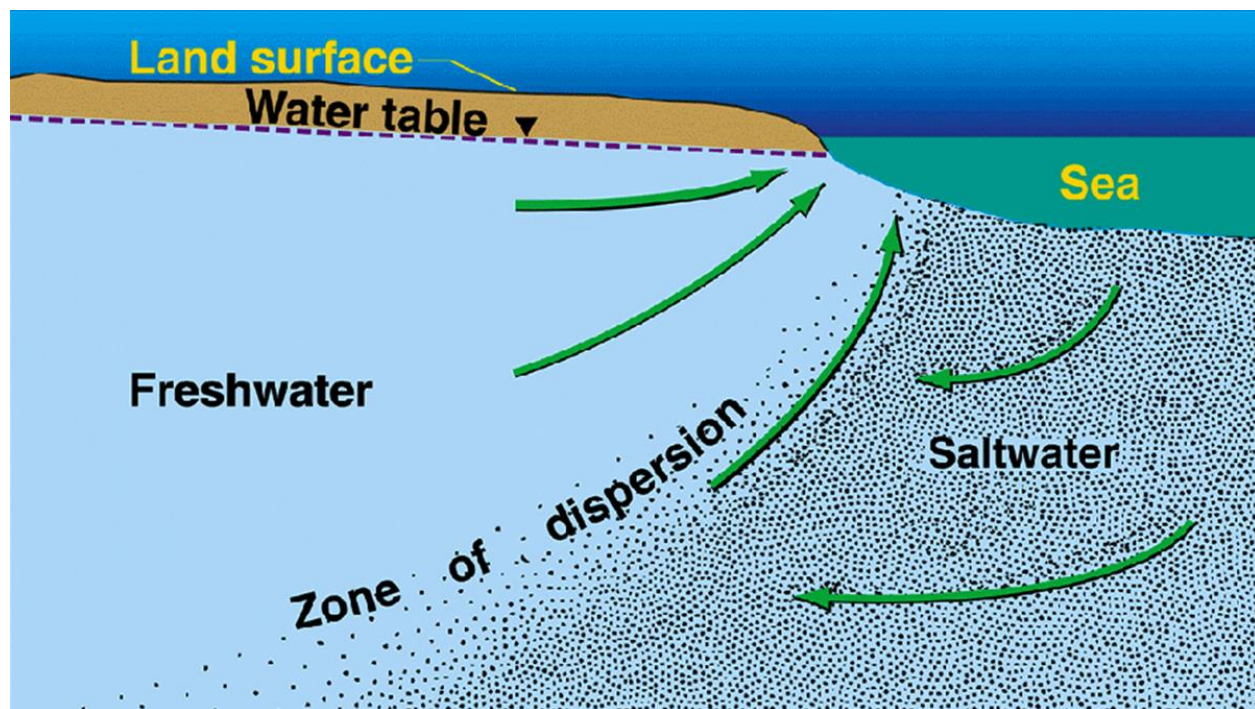
Napjatá zvodeň



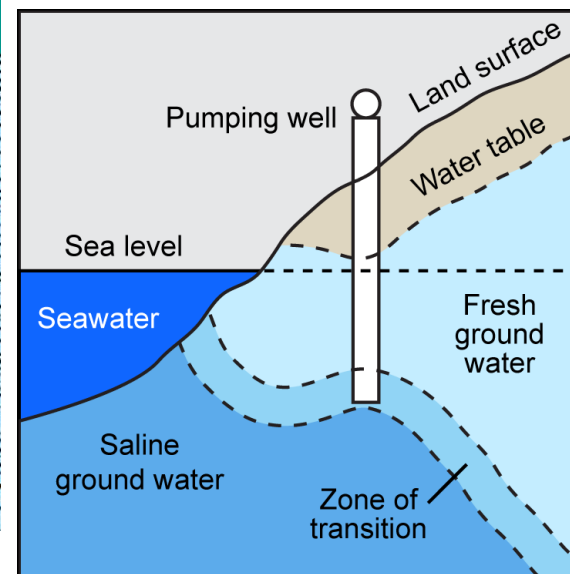
Měření hydraulické výšky v prostředí s různou hustotou vod

- různá hustota vody – rozdíly v mineralizaci, teplotě, tlaku
- obvykle pobřežní oblasti, hluboké sedimentární pánve
- vliv na hydraulický gradient $q = -k \cdot \text{grad}h$

Intruze mořských vod do sladkovodního kolektoru



(USGS)



(US EPA)

Měření hydraulické výšky v prostředí s různou hustotou vod

Zhodnocení proudění podzemních vod v prostředí s různou hustotou vod jako **ekvivalentu hydraulické výšky v prostředí s čerstvou vodou** (Ekivalent Fresh Water Head):

- bodová hydraulická výška h_i se skládá z polohové výšky z_i a z tlakové výšky $h_{p,i}$

$$h_i = z_i + h_{p,i} \quad h_{p,i} = \frac{P_i}{\rho_i g}$$

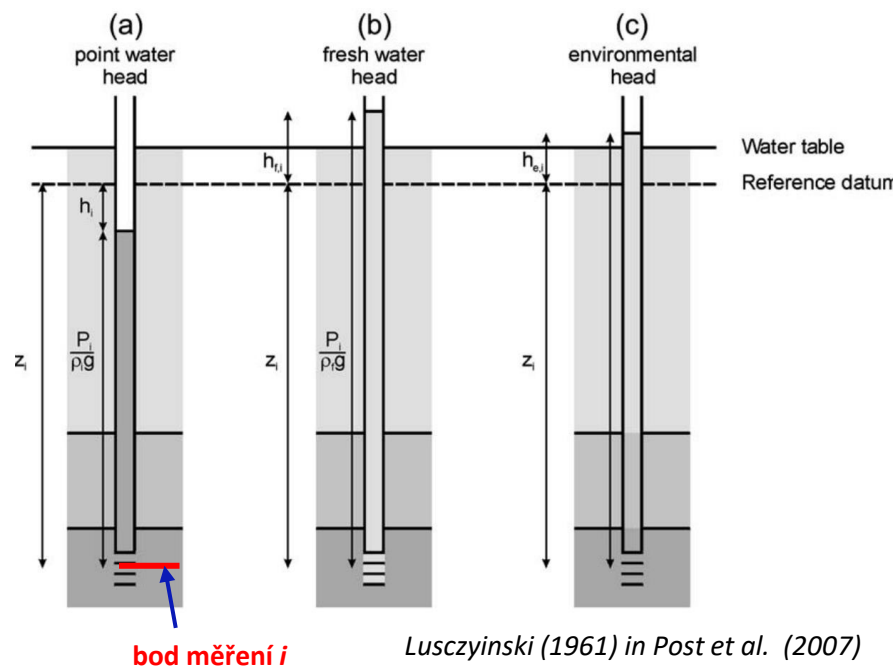
- normalizace $h_{p,i}$ pomocí referenční hustoty ρ_f na $h_{f,i}$ → sloupec vody v každém bodě pozorování hydraulické výšky $h_{p,i}$ bude nahrazen odpovídajícím sloupcem vody $h_{f,i}$ se stejnou hustotou ρ_f

$$h_{f,i} = z_i + \frac{P_i}{\rho_f g}$$

- na hodnotě ρ_f nezáleží, obvykle se však používá hustota „čerstvé“ vody → *fresh water head* $h_{f,i}$ (1000 kg/m^3)
- $h_{f,i}$ může být spočtena z bodové hydr. výšky h_i

$$h_{f,i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} h_i - \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} z_i$$

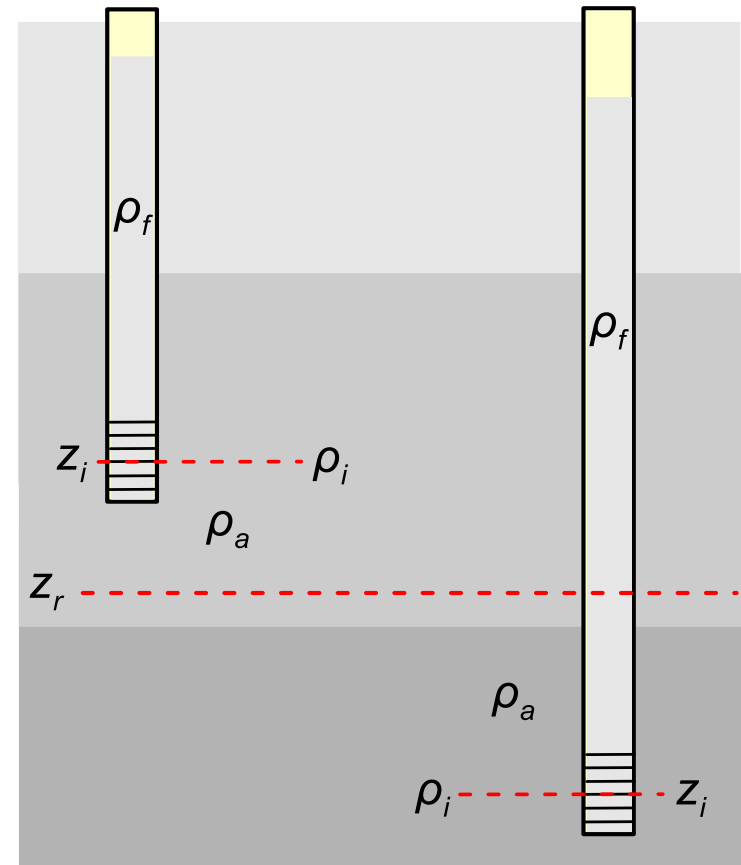
- stanovení hustoty ρ_i – tabulky, speciální software



Měření hydraulické výšky v prostředí s různou hustotou vod

- při hodnocení horizontálního proudění je klíčové, aby hydraulické gradienty byly hodnoceny z $h_{f,i}$ ve stejné hloubce – $h_{f,i}$ se může měnit s hloubkou
- pokud pochází měření tlaku P_i z piezometrů s různou hloubkou filtrační částí, je nutné, vypočítat $h_{f,i}$ ve vhodně zvolené referenční hloubce z_r
- následně vypočteme hydraulickou výšku $h_{f,r}$ odpovídající hustotě „čerstvé“ vody ρ_f a srovnávací úrovni z_r , kde ρ_a je průměrná hustota vody mezi bodem měření (z_i) a srovnávací úrovní (z_r):

$$h_{f,r} = z_r + \frac{P_r}{\rho_f g} = z_r + \frac{\rho_i}{\rho_f} (h_i - z_i) - \frac{\rho_a}{\rho_f} (z_r - z_i)$$

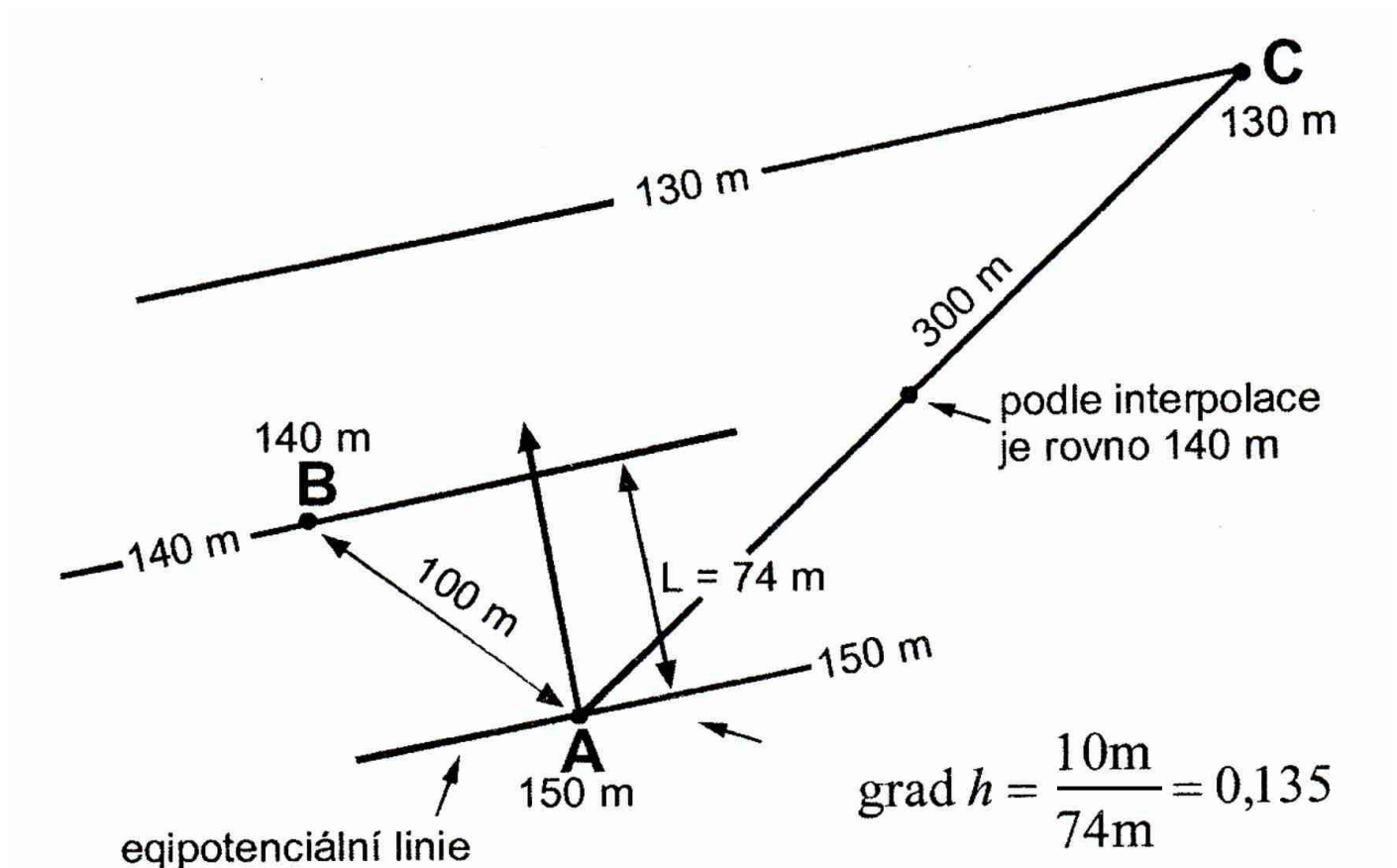


Nejistoty ve stanovení hydraulické výšky:

- přesnost stanovení závisí na znalosti prostorového rozložení hustoty vody a tedy určení ρ_a
- hustota vody se může měnit nejenom ve vertikálním, ale i v horizontálním směru

Hydrogeologický trojúhelník

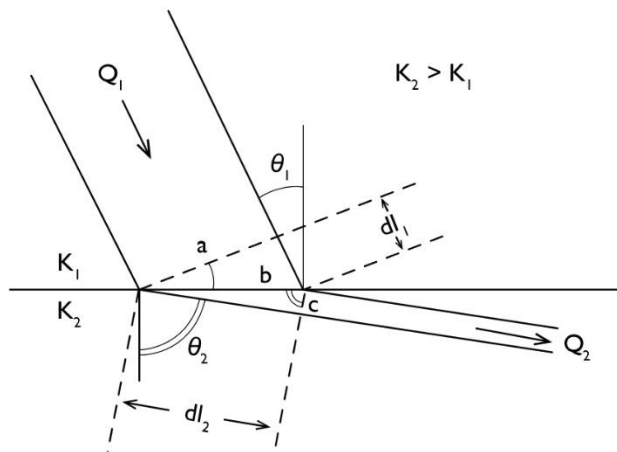
- určení směru proudění podzemních vod – minimálně 3 změřené objekty
- izolinie spojuje místa se stejnou výškou nacházející se mezi měřenými objekty
- interval izolinií – při velkých rozdílech hladin v metrech, malé rozdíly - desetiny metrů



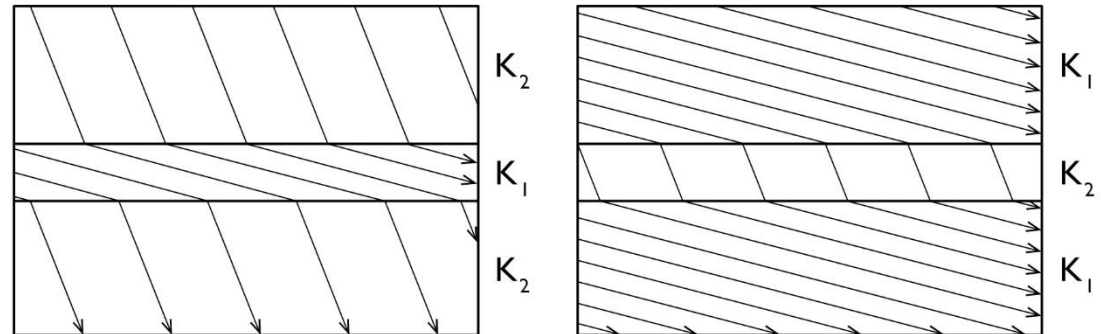
Pravidla tvorby ekvipotenciál v heterogenním a izotropním prostředí

- proudnice a ekvipotenciály se musí křížit v pravých úhlech
- ekvipotenciály se musí setkat s nepropustnou hranicí v pravém úhlu
- ekvipotenciály musí být paralelní s okrajovou podmínkou typu konstantní hladina
- u geologických rozhraní (kontakt např. dvou vrstev s odlišnou hydraulickou vodivostí) platí *Snellův zákon*

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$



Refrakce proudnic na geologické hranici



$$\frac{K_1}{K_2} = 10$$

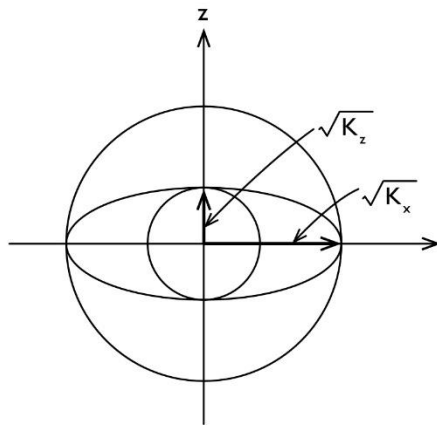
Refrakce proudnic ve více-vrstevném systému (Hubbert, 1940)

Pravidla tvorby ekvipotenciál v homogenním a anizotropním prostředí

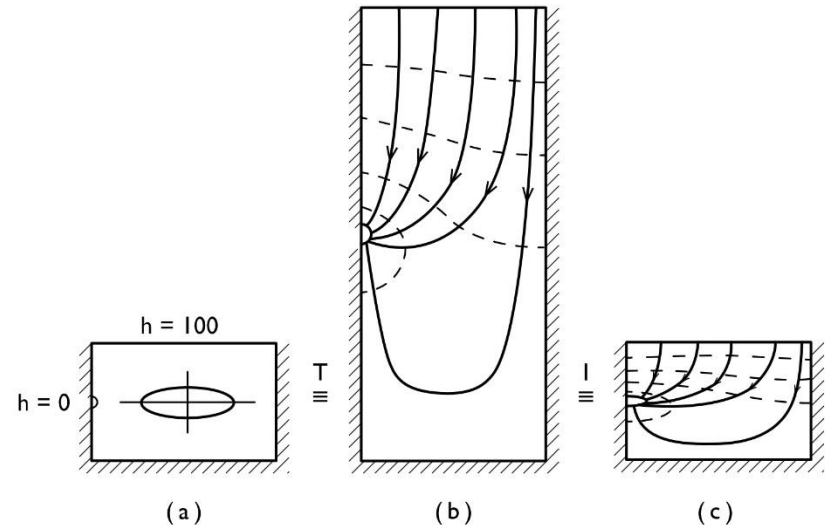
Transformace měřítka regionu proudění podél os X nebo Z (předpoklad uniformního rozložení anizotropie):

$$X = \frac{x\sqrt{K_z}}{\sqrt{K_x}}$$

$$Z = \frac{z\sqrt{K_x}}{\sqrt{K_z}}$$



Elipsa hydraulické vodivosti pro anizotropní prostředí s $K_x/K_z = 5$. Kružnice reprezentují dvě možné izotropní transformace



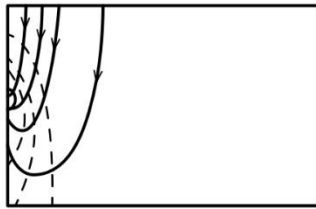
a) proudění v homogenním anizotropním prostředí s $\sqrt{K_x}/\sqrt{K_y}=4$, b) proudová síť v úseku transformovaném na izotropní prostředí, c) proudová síť v původním (inverzním) anizotropním prostředí

Nesoulad mezi směry anizotropie a směrem proudění:

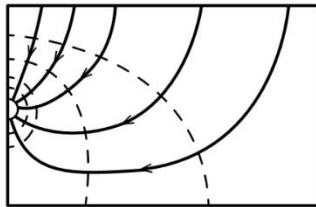
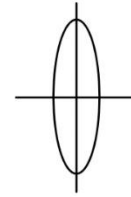
➔ Před transformací měřítka natočit region proudění podél jedné z os anizotropie, po transformaci opět vrátit do původní orientace

Pravidla tvorby ekvipotenciál v homogenním a anizotropním prostředí

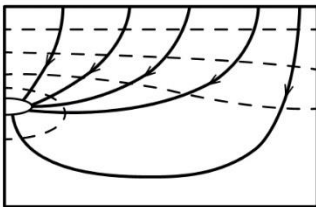
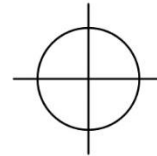
Vliv anizotropie na proudění podzemních vod



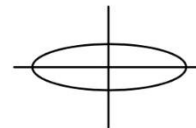
(a)



(b)



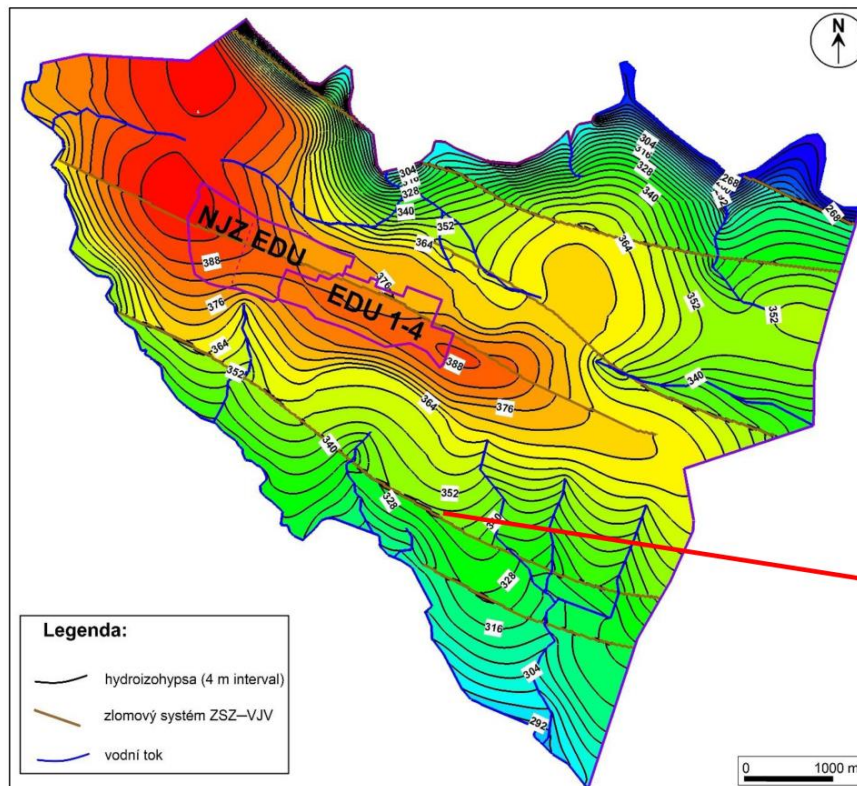
(c)



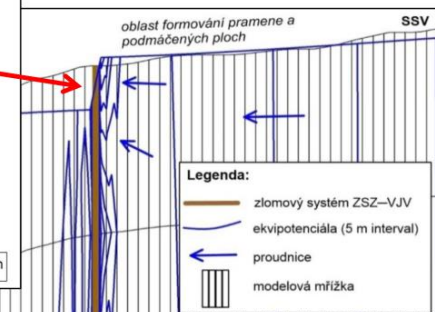
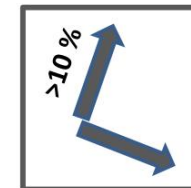
Proudová síť pro $\sqrt{K_x}/\sqrt{K_z} =$ a) 0.25; b) 1; c) 4
(podle Maaslanda, 1957)

Výskyt a hodnoty anizotropie

- závislost na geologické stavbě
- běžná je vertikální anizotropie – nižší hydraulická vodivost ve směru Z, např. fluviální prostředí – protažení klastů ve směru proudící vody, „snazší“ proudění podél jejich protažení tedy v horizontálním směru
- běžné hodnoty vertikální anizotropie jsou $K_x/K_z = 3$ až 10
- horizontální anizotropie K_x/K_y – např. v puklinovém prostředí - vyšší K podél určitého směru puklin



- Tvary horninových těles
- Zlomový systém ZSZ-VJV
- Anizotropie hydraulické vodivosti



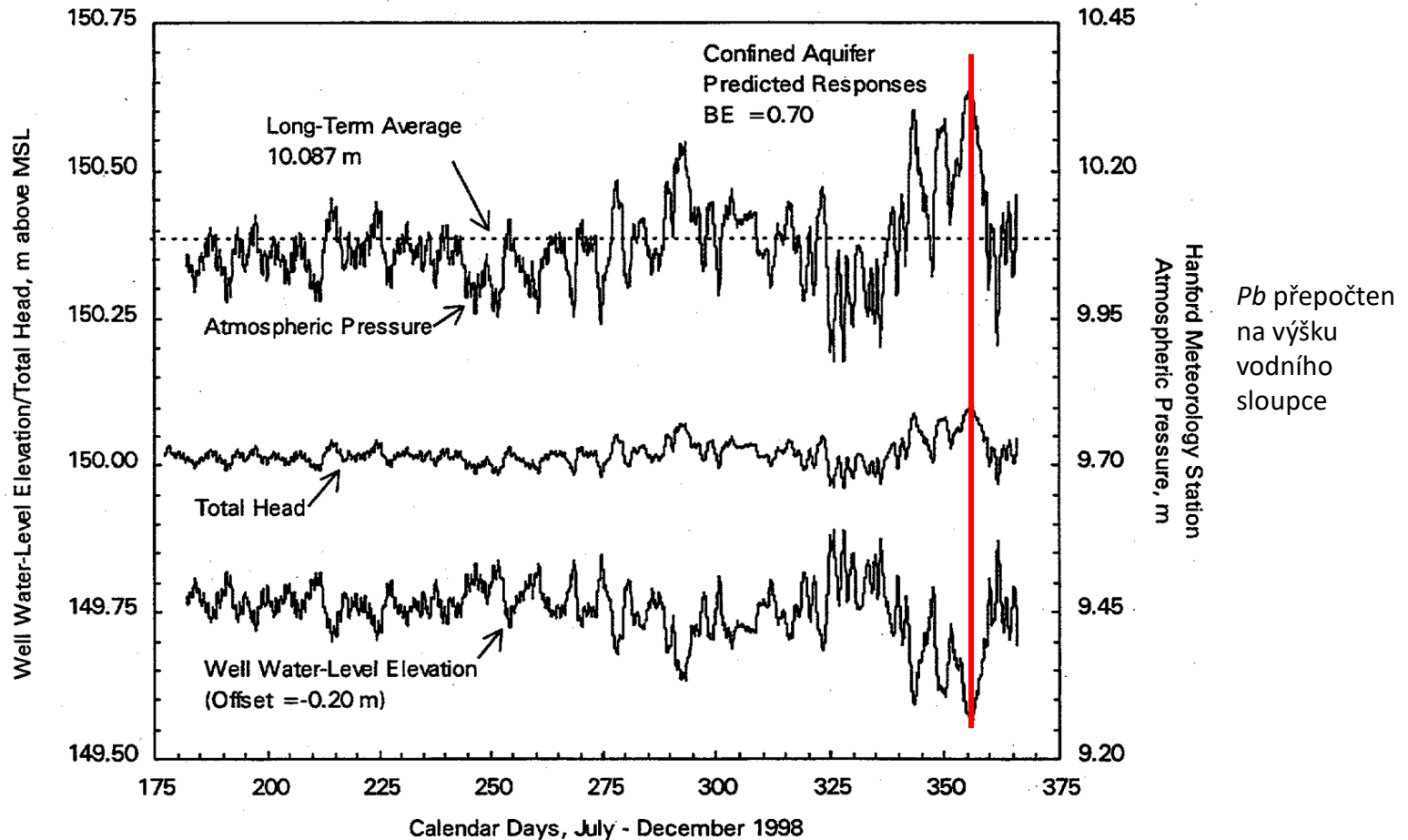
Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

- změna barometrického tlaku (P_b) → změna hladiny podzemní vody v kolektoru (*HPV*) a ve vrtu (*VHPV*)
 - tlak na vodní sloupec ve vrtu
 - tlak na horninu – pružná storativity
- přímo úměrný vztah mezi P_b a *HPV* - zvýšení P_b – stlačení horniny – zvýšení *HPV*
- inverzní vztah mezi P_b a *HPV* měřenou ve vrtu (*VHPV*): zvýšení P_b převyšuje zvýšení tlaku ve vodě, proto je voda z vrtu odtlačena do kolektoru → snížení hladin ve vrtu (až o > 1 m)
- velikost změny *HPV* a *VHPV* vlivem změny P_b je přímo úměrná napjatosti kolektoru a hydraulickým a storativitním charakteristikám kolektoru a vrtu
- zpoždění změny mezi P_b a *HPV* jen u volné zvodně
 - zpoždění transmise P_b nesaturovanou zónou (její hloubka a propustnost pro vzduch)
 - může dojít i ke zpoždění u *VHPV*: přesun vody z vrtu do horniny – vlastnosti kolektoru (transmisivita, storativita) a vrtu (objem vrtu, skinový efekt)

Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

Napjatá zvoděň

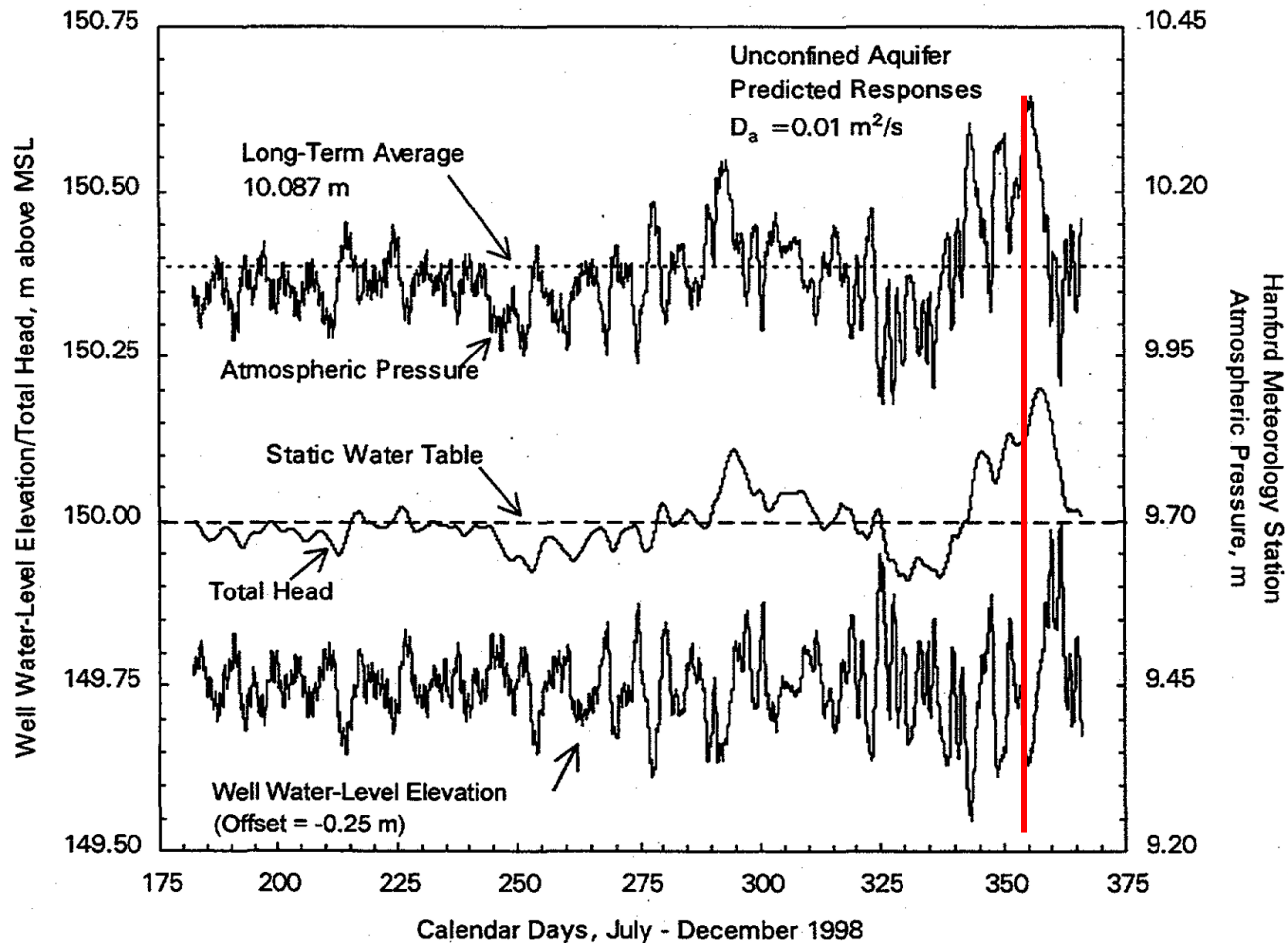
- okamžitý vliv změny P_b na HPV a VHPV



Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

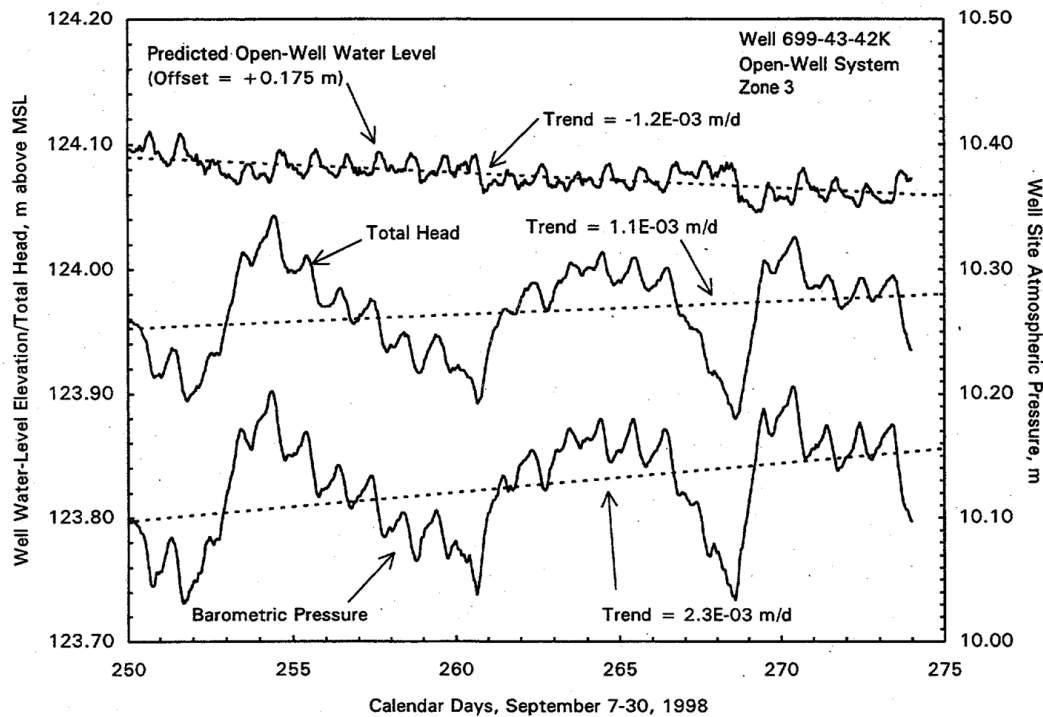
Volná zvedeň

- zpoždění mezi P_b a HPV až několik dní



Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

Ukázka vlivu změny P_b na HPV

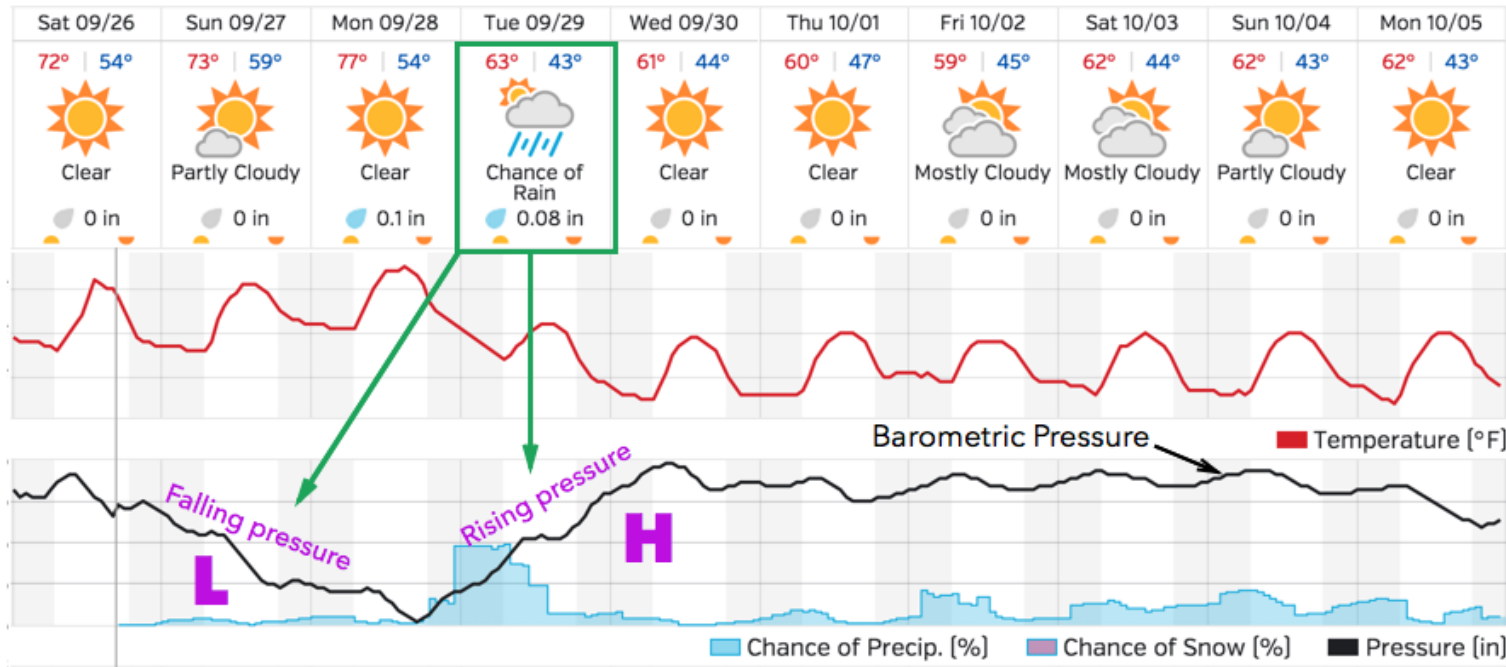


pozn. Změna P_b má samozřejmě vliv i na **povrchové vody** – měření průtoku:
změna hladiny o několik centimetrů může způsobit významnou chybu v měření průtoku ($i > 10\%$)

Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

Vliv změny P_b na HPV

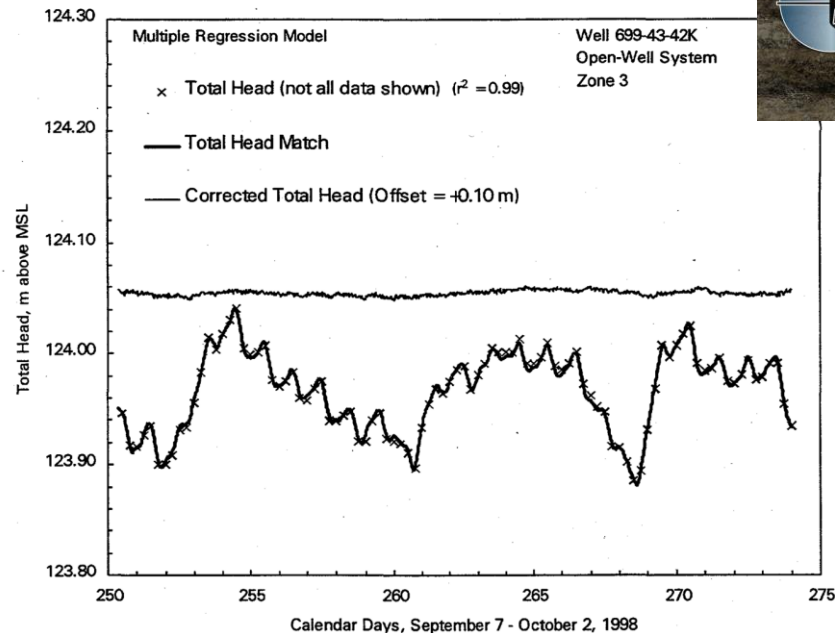
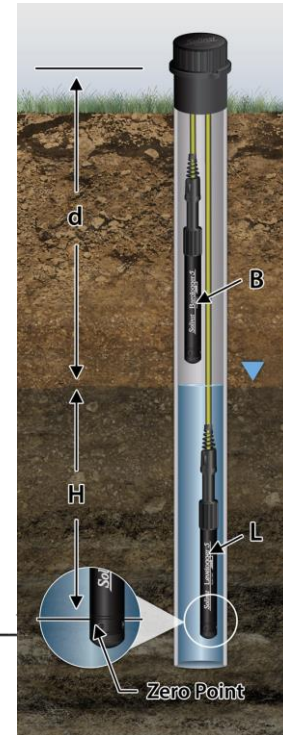
- *nejmenší vliv na mělké kolektory ve volném režimu proudění*
- *výraznější vliv hlouběji se vyskytující kolektory a napjaté zvodně*
- nutnost korekce na změnu P_b : zejm. pro dlouhodobější pozorování hladiny
 - např. v průběhu čerpací zkoušky letní bouřka – zahájena při slunečném počasí (vysoký P_b), následuje bouřka (nízký P_b) a opět slunečné počasí – nízký tlak způsobí vzestup hladiny či zpomalení jejího poklesu při čerpání



Vliv barometrického tlaku na hladinu podzemních vod

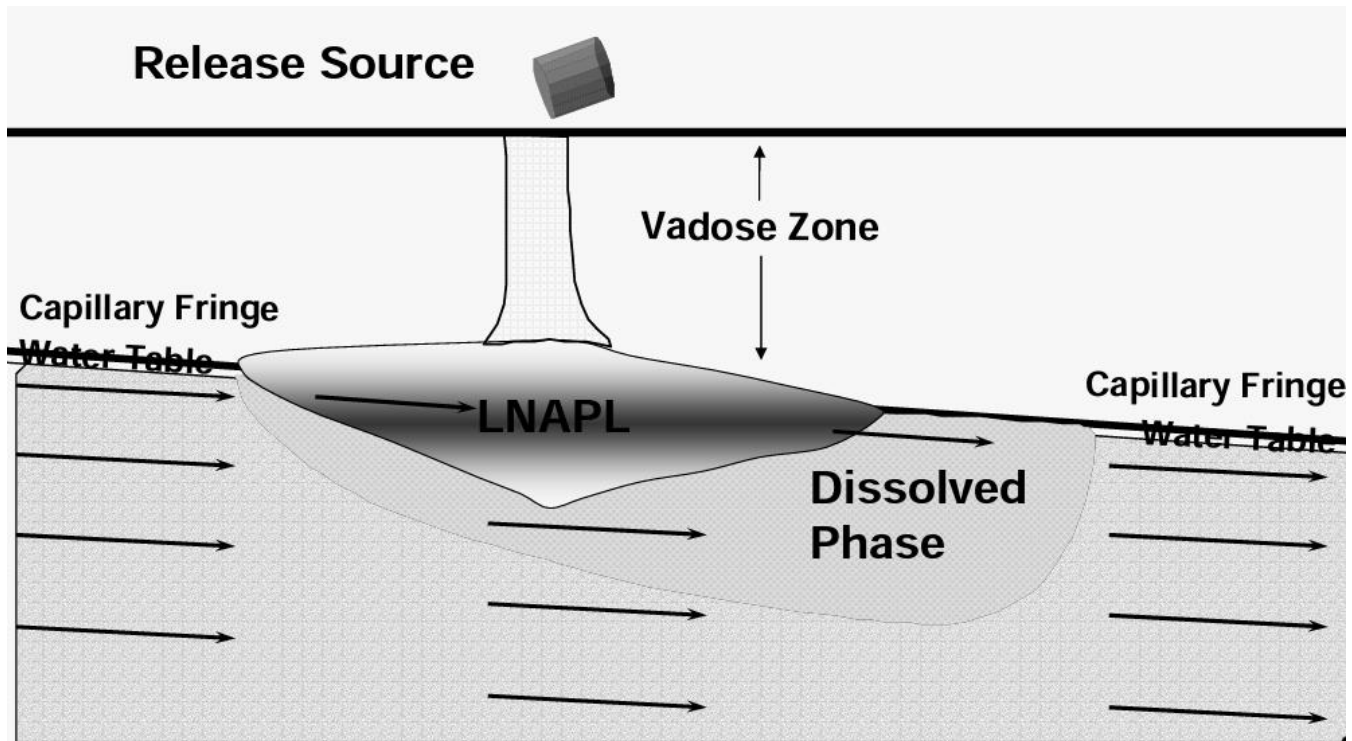
Metody korekce

- v prostředí s mocnou vadózní (nesaturovanou) zónou tlakové zatěsnění vrtu snižuje vliv P_b na hladinu až o jeden řád
- *kompensace změny P_b* : hladinoměr doplněn o barometr
 - pokud je barometr od hladinoměru oddělen, je nutná jeho instalace nad nejvyšší možnou úroveň hladiny vody
 - hladinoměr měří tlak vody + P_b
 - barometr měří tlak vzduchu P_b
 - data z hladinoměru jsou automaticky softwarově kompenzována o změny tlaku naměřené barometrem



Měření hladiny v přítomnosti volné fáze LNAPL's

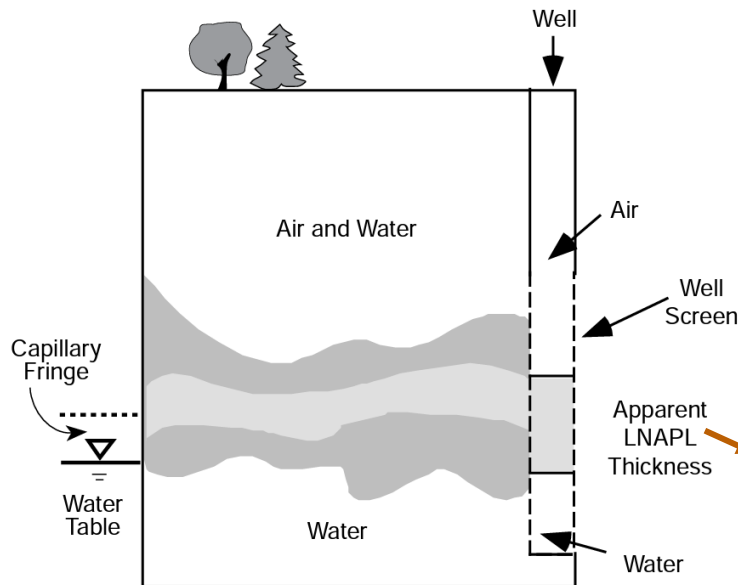
Výskyt volné fáze LNAPL's má vliv na hloubku hladiny podzemní vody



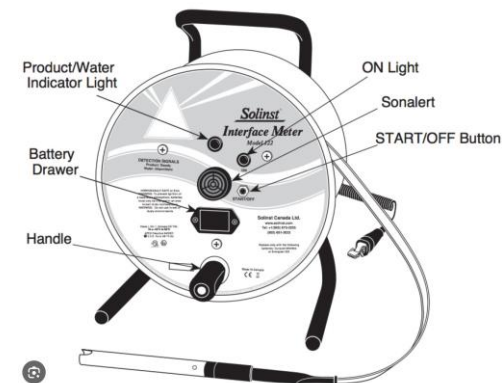
Měření hladiny v přítomnosti volné fáze LNAPL's

Korekce na hladinu bez volné fáze:

- určit mocnost vrstvy LNAPL's – lze jen přibližně
- zjistit hustotu přítomné LNAPL's
- vypočítat hloubku zanoření volné fáze
- hladina je na úrovni zanoření volné fáze



bývá 2 až 10 krát větší než v okolním kolektoru



Např.: 1 m mocná fáze o hustotě 800 kg/m³ bude ve vodě o hustotě 1000 kg/m³ zanořena 0.8 m. Hladina podzemní vody by zde tedy byla 0.2 m pod povrchem volné fáze, či 0.8 m nad rozhraním LNAPL's/voda

Pravidla měření hladiny vod

Měření hladiny podzemních vod

Vrty, studny – ověřit nečerpají-li se, popř. je-li vydatnost odběru podzemních vod dlouhodobě stabilní

Trvání jedné etapy měření - měření více objektů v co nejkratším časovém intervalu (kolísání hladin)

Režimní měření – několik etap měření v průběhu roku – rozložit tak, aby byly zachyceny vysoké stavy hladin (březen, duben) i nízké stavy hladin (srpen, září)

Měření hladiny povrchových vod

Pro konstrukci mapy hydroizohyps nezbytné zaměřit také hladinu povrchových vod (potoky, řeky, drenážní rýhy).

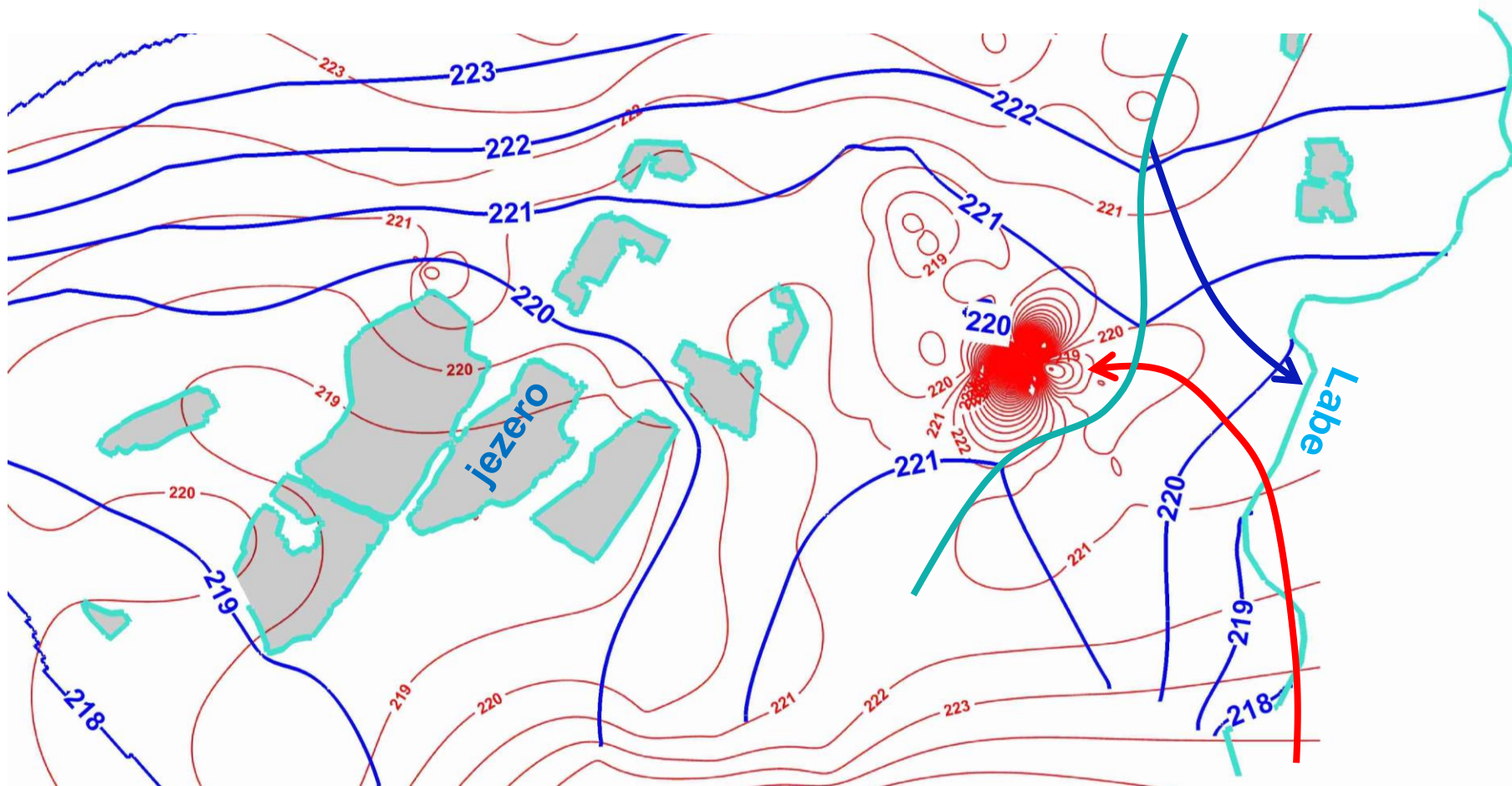
Jezy, splavy – zaměřit hladinu nad a pod vodním stupněm

Je nutné ověřit, jsou-li povrchové vody v hydraulické spojitosti s podzemními vodami (změna průtoku mezi dvěma body jeho měření, charakter hydrogramu → shodný sklon recesních větví, log. měřítko).



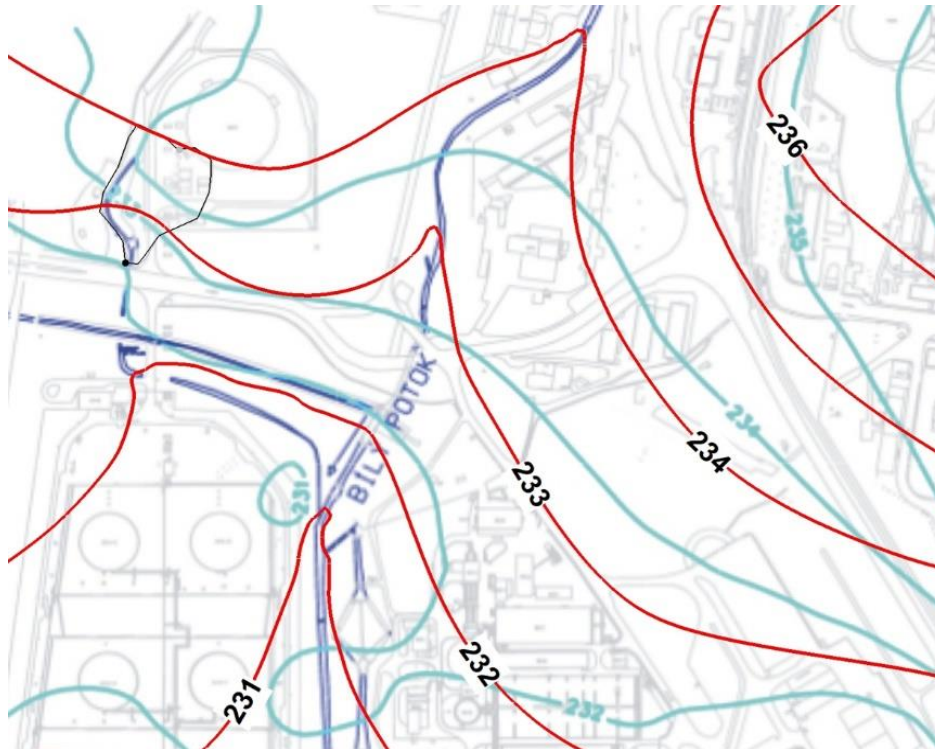
Interpretace naměřených hladin

- automatická interpolace (např. Surfer, GIS): viz. obrázek (obr. - červené křivky)
- ruční kreslení hydroizohyps (výkres nebo grafický program)
- numerické modelování proudění
- nezbytná interpretace vztahu mezi povrchovými a podzemními vodami (obr. - modré křivky), či proměnlivosti transmisivity, anizotropie.....



Interpretace naměřených hladin

- automatická interpolace (např. Surfer, GIS): viz. obrázek (obr. - červené křivky)
- ruční kreslení hydroizohyps (výkres nebo grafický program)
- numerické modelování proudění
- nezbytná interpretace vztahu mezi povrchovými a podzemními vodami (obr. - modré křivky), či proměnlivosti transmisivity, anizotropie.....



Odměrný bod

- výškově stálý bod, od kterého je měřena hloubka hladiny podzemní či povrchové vody
- okraj vrtu, studny (je-li skruž či zhlaví vrtu ukloněné tak OB vyznačit sprejem)
- v případě poklopu na vrtu – poklop odložit, poklop na studni posunout (opět vrátit!)
- od OB bodu měřit i během dalších etap měření
- popsat OB do terénního deníku



Zaměření odměrného bodu

Polohové souřadnice:

GPS, detailní mapový podklad

Nadmořská výška všech hydrogeologických objektů – tachymetrie, nivelace

Tachymetrie – zaměření polohy a výšky bodu

zaznamenává se horizontální a vertikální úhel

moderní přístroje tzv. totální stanice mají laserový dálkoměr



Zaměření odměrného bodu

Polohové souřadnice:

GPS, detailní mapový podklad

Nadmořská výška všech hydrogeologických objektů – nivelace

Geodetická nivelace – určuje převýšení mezi body: nivelační přístroj (dalekohled, stativ) + nivelační lať (+ výchozí nivelační bod k určení absolutní nadmořské výšky, česká státní nivelační síť - <http://bodovapole.cuzk.cz>)



čepová značka (ve stěně)



hřebcová značka (na zemi)

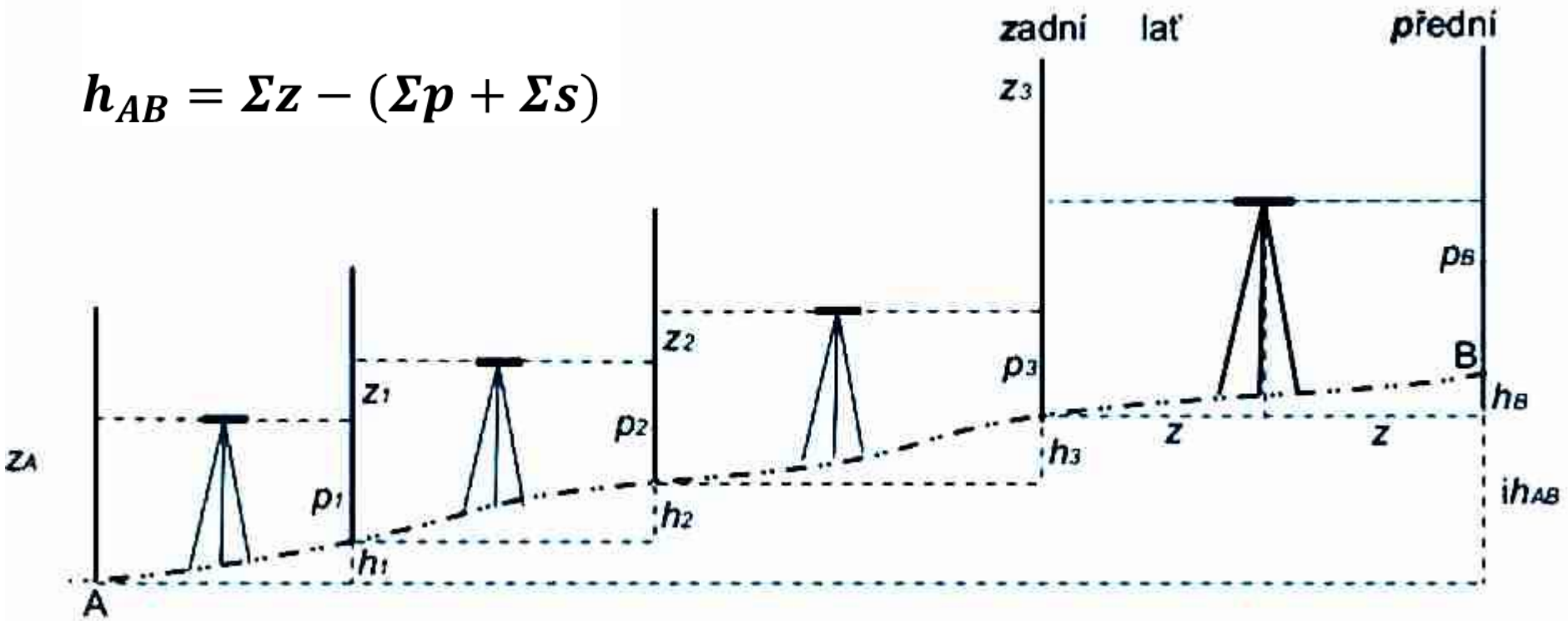


Výšková nivelace

- 1) vyhledat výchozí nivelační bod <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/?k=503>
- 2) první měření je tzv. **čtení vzad (z)**
- 3) další měření směrem k cílovému bodu, který chceme zaměřit je tzv. **čtení vpřed (p)**
- 4) pokud při hlavní trase nivelujeme také okolní body jde o tzv. **čtení stranou (s)**
- 5) Výsledná výška bodu je dána rozdílem sumy čtení vzad a sumy čtení vpřed

$$h_{AB} = \Sigma z - \Sigma p$$

$$h_{AB} = \Sigma z - (\Sigma p + \Sigma s)$$



Výšková nivelace

výpočet výšky *konečného* niveláčního bodu

Zápisník pro nivelaci

niveláční bod [m n. m.]	čtení na lati [mm]			nadmořská výška objektu [m]	poznámka	hloubka hladiny od odměrného bodu + datum měření [m]
	vzad	vpřed	stranou			
	+	-	-			
501.205	808					
		250				
	1235					
			2685	500.313		DR St1
		303				
	2719					
			110	505.304		DR SKL2
			430	504.984		DR SKL1
		1118				
	2900					
		800		=B5+((C5+C7+C10+C14)-(D6+D9+D13+D15))/1000		HV2

výpočet výšky niveláčního bodu situovaného *stranou* trasy ke konečnému niveláčnímu bodu

Zápisník pro nivelaci

niveláční bod [m n. m.]	čtení na lati [mm]			nadmořská výška objektu [m]	poznámka	hloubka hladiny od odměrného bodu + datum měření [m]
	vzad	vpřed	stranou			
	+	-	-			
501.205	808					
		250				
	1235					
			2685	500.313		DR St1
		303				
	2719					
			110	=B5+((C5+C7+C10)-(D6+D9+E11))/1000		DR SKL2
			430			DR SKL1

Náležitosti mapy hydroizohyps (hydroizopiez)

- měřené objekty a jejich označení (vrty, studny, drenáže, povrchové toky – jezy, místa měření na vodoteči)
- hladiny vod k určitému datu
- izolinie
- směry proudění podzemních vod
- legenda

<p>HV108 Bečva hydrogeologický vrt hydroizohypsa směr proudění podzemních vod</p>		
Diplomová práce		
Ochrana prameniště Troubky před znečištěním z chemického závodu PRECHEZA		
Mapa hydroizohyps a směrů proudění podzemních vod ze dne 23. 4. 2003	Měřítko 1 : 10 000	
Mapa hydrogeologických objektů	Příloha č. 1	

